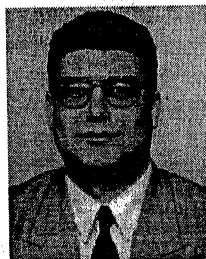


НЕДЕСТРУКТИВНО ТЕСТИРАЊЕ НА МАТЕРИЈАЛИ СО ПОМОШ НА ВРТЛОЖНИ СТРУИ



Д-р Влатко Чингоски
Сектор за развој и инвестиции,
Електростопанство на Македонија

Во овој труд сакаме да направиме еден сеопфатен осврт на употребите, методите, начинот и резултатите кои се добиваат од неdestructивното испитување на немагнетните материјали со помош на вртложни струи. Ќе покажеме дека овој метод е високо ефективен, брз и сигурен во голем број на практични случаи каде другите методи не можат ефикасно или пак воопшто не можат да се употребат. Ќе се запознаеме со физичките основи на овој метод, неговите можности за апликација, видови на проби како и нивните предности и недостатоци. На крај ќе дадеме и неколку насоки во смисол на подобрување на квалитетот на резултатите како и можни правци за развој и истражувања во оваа област.

Тестирањето на материјалите со помош на вртложни струи (eddy-current testing - ECT), е една од најпознатите методи за неdestructивна анализа на материјалите по однос на постоењето на дефекти, пукнатини или деформации, без разлика дали се тие во внатрешноста на материјалот или пак површински распространети [1]. Овој метод наоѓа голема примена особено за in-service инспекција на цевките на генераторите на пареа (парегенератори) во нуклеарните центри со реактор со пареа под притисок (PWR - pressurized water reactor), потоа на изменувачите на топлина и кондензаторите кај конвенционалните и модерните нуклеарни центри и термоцентри, гасно-комбинирани термоцентри, рафинериите или другите хемиски инсталации.

Заеднички именител кај сите нив е потребата за постојана и засилена сигурносна контрола на сите цевни инсталации заради постигнување на сигурност и стабилност на целокупниот работен процес. Многу важен параметар е и потребата за следење и најавување на било каква аномалија при работењето на постројката, анализа на нивото на опасност на проблемот, негово следење и по можност отстранување без запирање на работниот процес. Овој метод овозможува анализа на материјалите без демонтажа на испитаниот дел, ниту пак со превземање на било каква деградација на самиот материјал што е од исклучително значење како заради непрекинатооста на самиот тех-

нолошки процес, така и заради големите трошоци кои еден такв предвиден или непредвиден застој би имал од финансиска гледна точка. Со оглед на фактот што кај овој метод не постои никаков директен контакт меѓу испитуваниот примерок и пробата (сензорот), најпрво, секаков хавариски случај е предвременно исклучен, и како второ и многу значајно, целокупниот процес на тестирање може да биде потполно автоматизиран.

Заради сите горенаведени предности кои овој метод ги нуди на своите корисници, широк спектар на најразлични видови на проби се појавиле и секојдневно се појавуваат. Покрај наједноставниот вид на проба или сензор, сензорот "палачинка" (pan-sake probe), па преку Чеко-проба (Checco probe), плус-point проба, fluxset проба, итн., различни видови на сензори секојдневно се воведуваат во употреба со најразличен успех. Поради тоа, развивањето на се понови видови на сензори е императив со цел да се подобри квалитетот на тестирањата [2 - 4].

Методите за неdestructивно тестирање во литературата може да се сретнат и под името методи за неdestructивна евалуација (НДЕ), бидејќи тие овозможуваат не само да се пронајде местоположбата на дефектот, туку и во исто време да се направи квалитативна и квантитативна анализа и евалуација на големината, значењето и опасноста што тој дефект ја има врз деградацијата на материјалот како и самиот произведен про-

пес. Ова својство на НДЕ уште повеќе допринесува за нејзина широка распространетост како евалуационен метод.

Овој труд е организиран на следниот начин: најпрво ќе направиме краток преглед на постоечките методи за анализа на квалитетот на материјалите, а понатака ќе се запознаеме со физичките особини и начинот на работа на сензорите кои работат врз принципот на генерирање на вртложните струи. Ќе се запознаеме со неколку типични видови сензори кои масовно се користат за неdestructивна анализа, за потоа подетално да се запознаеме со еден современ вид на сензор кој во моментот дава еден од најдобрите резултати при тестирањата. Ќе научиме како се читаат добиените сигнали, како се истите анализираат заедно со сите нивни предности и ограничувања. На крај ќе дадеме резиме на целокупниот труд со смерници за понатамошни можности за испитување и истржување во доменот на неdestructивното тестирање на материјалите.

Принципи на работа на сензорите базирани на вртложни струи

Како што и самото име кажува, пробите кои работат врз база на вртложните струи се всушност во исто време генератори и приемници на магнетно поле. Едноставно кажано, овие проби се состојат од намотка која е извор на променливо магнетно поле и која се вика возбудна намотка и индукциона намотка во која треба да се индуцира сигналот кој треба да се анализира. Појавата на електричен сигнал е директен резултат од взаемното дејство помеѓу електромагнетното поле генерирано од возбудната намотка и електромагнетното поле генерирано од вртложните струи кои ќе протечат низ испитуваниот материјал како реакција на постоењето на возбудното магнетно поле. Наједноставни се

пробите кои имаат само една намотка што во исто време е и возбудна намотка и индукциона намотка. Овој тип на проба кој поради својата форма го носи името "палачинка" (rap-sake probe) има голема примена во некои поедноставни случаи или пак како модел резултат за споредба на резултатите со нови и посовремени типови на сензори т.е. проби.

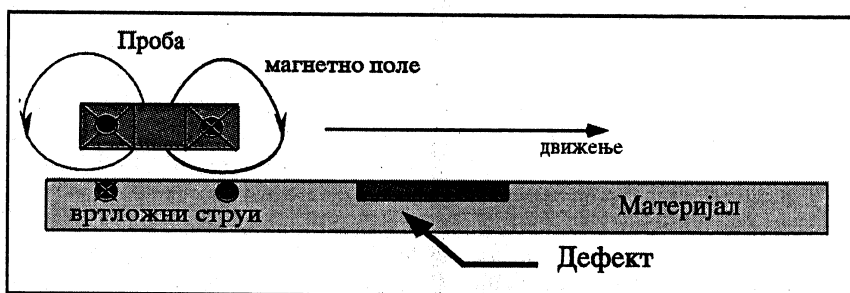
На Сл. 1 прикажана е општа шема по која се врши неdestructивно испитување на материјали со помош на вртложни струи. Пробата или сензорот се движи рамномерно над испитуваниот материјал. Низ него протекува струја која создава наизменично магнетно поле кое поради појавувањето на вртложните струи внатре во материјалот е

ва опасност за понатамошната работа, дали е единечен или повеќеброен и сл. Сигналот кој се добива од сензорот се води директно на екран или пак во некој експерски изработен систем кој најчесто работи на база на неуромрежи или логички контролери кои можат веднаш да дадат одговор на сите непознаници во однос на карактеристиките на дефектот.

Од сето ова може да се заклучи следното:

1. Материјалот што се испитува мора да биде проведен за да може низ него да протечат вртложните струи.

2. Дебелината на испитуваниот предмет мора да биде конечна за да се постигнат добри резултати (овде зборуваме за цевки кои секогаш имаат конечна дебелина).



Слика 1: Неdestructивна анализа со помош на вртложни струи.

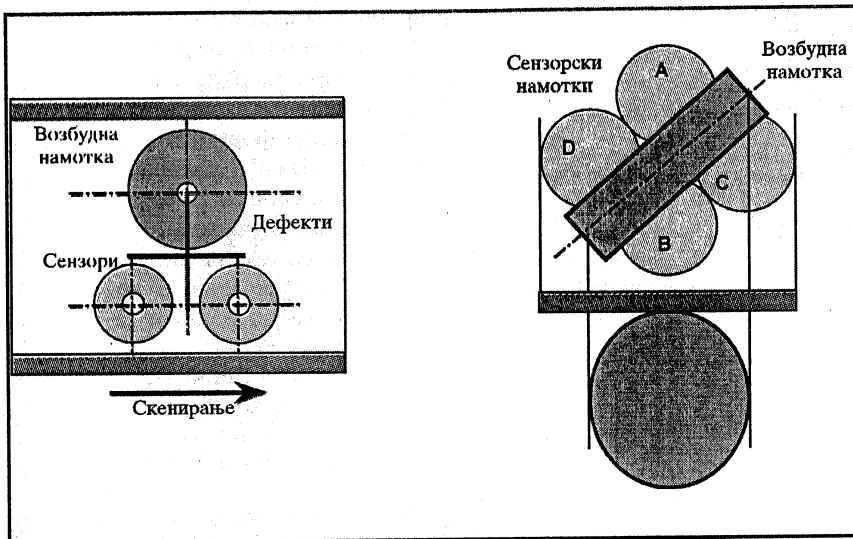
несиметрична по оската на движење. Но, и покрај тоа сигналот на излезот од сензорот ќе биде непроменет се додека имаме рамномерна површина под сензорот без никакви дефекти. Во оној момент кога ќе се појави дефект во материјалот, распределбата на вртложните струи ќе се промени, а како резултатот на тоа ќе се промени и полето, а со тоа и интензитетот и формата на сигналот кој ќе се добие. Врз основа на промената на интензитетот и формата на сигналот, може да се констатира за каков дефект станува збор, неговата местоположба, дали е тој од иста страна со сензорот во внатрешноста на материјалот или пак на спротивната страна од сензорот во однос на испитуваниот материјал, колку е долг, широк па дури и колку е длабок дефектот, дали претставу-

Од дебелината на материјалот во голема мерка ќе зависи и фреквенцијата на возбудната струја која се користи во сензорот.

3. Испитувањето може да се остварува многу брзо и лесно да се автоматизира. Обично брзината на движење на сензорот е неколку десетици центиметри во секунда.

4. Растојанието меѓу сензорот и испитуваниот материјал треба да биде константно, за да се избегне појавување на нерегуларни сигнали кои наместо да бидат резултат на постоењето на дефект, најчесто ќе бидат резултат на бучавата на сигналот (noise). Многу е важно да се намали бучавата на сигналот и да се зголеми односот сигнал/бучава за да се добијат што поточни резултати при мерењата.

Може да заклучиме дека користењето на една и иста намотка како возбуда и како индукциона (една намотка како извор на поле и сензор), не е оптимално и има големи проблеми во случај на евалуација на дефекти со многу мали димензии или пак детекција на мултидефекти, односно повеќе дефекти на многу мал простор. Тоа е и основната причина зошто денеска рап-саке пробите не се користат во голема мерка. Тие имаат едукативна намена и постепено се заменуваат со многу посовремени и поточни сензори за кои ќе кажеме нешто во продолжение на овој труд.



а) Сессо проба

б) Four- coils проба

Слика 2: Два типа на невеструкиивни проби базирани на врлложни сйруи.

3. Неколку типови на проби

Со развојот на нуклеарната технологија и паралелно со тоа и попребата за што поточна и повизурна работа на истите, се појавуваат на различни видови на проби за невеструкиивна анализа [1, 4]. Секоја од нив се карактеризира со определени предности и недостатоци како во однос на помисела на анализите така и во брзината на тестирањето и нејзината применивост за детекција на различни видови на дефекти. Меѓу најраспространетите видови на проби се т.н. Чесо проба (Chessco probe), Round-robin проба, Four-coils проба, проба со ротирачко поле, магнетен fluxset проба, итн. На Сл. 2 прикажани се шематски Чессо пробата и four-coils пробата заради добивање на сознание кај нашите читатели за фактичкиот начин на работа на овие електромагнетни уреди.

Основни карактеристики кои ја дефинираат успешноста со која една проба може да дијагностицира постоење на дефект како и да ги дефинира параметрите на тој дефект се пред се робусноста и универзалноста на нејзината употреба. Многу важен момент е јачината на сигналот кој се добива како резултат на скенирањето, како и влијанието на видот на материјалот врз до-

биениот резултат, неговата форма (плоча или цевка), постоење на потпорен (магнетен материјал кој ја зголемува значително буката на сигналот (noise)), односот сигнал/бука како и влијанието на растојанието меѓу пробата и испитуваниот материјал (lift-off) и отстапувањето од паралелата меѓу материјалот и пробата (declination). Сите овие параметри мора да се земат во предвид за да може со голема сигурност да се дефинираат карактеристиките на дефектот.

За да можат да се утврдат квалитетите на разни видови проби кои речиси секојдневно се појавуваат на пазарот на невеструкиивна анализа, утврдни се заеднички критериуми т.н. benchmark или споредбени проблеми. Предноста на ваквиот начин на работа се состои во фактот што било кој во светот работи со еден ист проблем и се обидува најпрво нумерички, а потоа и експериментално да го тестира својот сензор, докажувајќи дека неговата примена е поцелисходна во однос на веќе постоечките сензори или пак дека неговата примена е поширока од досегашните.

2.1 Benchmark Проблеми

Општо прифатени во до-

менот на невеструкиивната анализа со помош на вртложни струи се следните шест видови на benchmark проблеми [2], [4]:

1. Рамна плоча без дефекти

Се испитува проведен материјал без дефекти. Дефинирани се големината на плочата, големината на сензорот, видот на материјалот и фреквенција на тестирање. Воглавно, овој тест се изведува за рап-саке проба. Овој тест најчесто се користи за тестирање на точноста на нумеричкиот код кој се користи при анализите.

2. Рамна плоча со дефект

Се следи промената на импеданцијата на сигналот како резултат на постоење на дефект на површината на испитуваниот материјал. Се третира ист материјал како и во погорниот случај и се анализираат неколку видови на дефекти направени со помош на ЕДМ (electric discharge machine).

3. Модел на вистинска цевка од парагенератор со дефект

Се испитува модел на вистинска цевка на парагенератор од нуклеарен реактор. Се анализира 1/4 од цевката со неколку дефекти со различни димензии. Поради постоење на криволиниска повр-

шина (curvature) добиените сигнали за дефекти во овој тест треба да се поголеми по амплитуда од оние добиени за дефект со исти димензии како во тестот под 2.

4. Рамна плоча со надворешен дефект

Се анализира сигнал со помош на панкаце проба поставена во центарот на три испитувани примероци. Големината на примероците како и формата на дефектот е иста како и во другите тестови, само што овде се работи за подлабоки дефекти од горенаведените.

5. Депозити и потпорни плочи

Се анализираат модели кои се многу блиски до вистинската ситуација при анализите во природната положба на цевките - постоење на депозитни материјали на надворешноста на цевката, или уште почесто постоење на потпорни плочи или делови од плочи кои служат како механичка потпора на цевките во вистинските центри. Овие материјали најчесто генерираат бука во сигналот (noise) и допринесуваат за потешко дефинирање на параметрите на дефектот. Овие депозити или потпорни материјали се најчесто изработени од бакар или пак од магнетен материјал.

6. Дефекти со различна форма

Се разгледуваат неколку видови на дефекти со различна форма, за да може да се оцени реагирањето на различни типови на сензори на различни видови на дефекти. Најчесто се разгледуваат следните форми на дефекти: а) елиптички, б) трапезоиден, в) скалест, и обичен г) правоаголен дефект. Се мери амплитудата, фазната разлика и формата на сигналот за да може да се дефинираат некои групи на сигнали кои дефинираат форма на анализираниот дефект.

2.2. Нумеричка анализа

Како што веќе напоменавме, за да се проверат карак-

теристиките на секој нов вид на сензор, најпрво се вршат редица на тестирања користејќи ги горенаведени шест benchmark проблеми. За нумеричка анализа на електромагнетното поле, а подоцна и на вртложните струи кои се генерираат внатре во проводниот материјал и поради чие присуство во намотките на сензорот се индуцираат напони кои ние ги нарекуваме сигнали и чија амплитуда и фазна разлика ја следиме, можат да се користат поголем број на нумерички техники [5], [6]. Со оглед на фактот што станува збор за извонредно тешка геометрија (циркуларни цевки со многу мали димензии, а особено дебелина на цевката, високи фреквенции, мала пенетрација на врложните струи, итн.), видот на методите кои можат да се користат со навистина задоволувачка прецизност на добиените резултати, е прилично редуциран. Најчесто се користат методата на конечни елементи и тоа со повеќе подвидови со неколку бази величини како непознати (А - ϕ , Б - Е, или Г метода со јазлови или рабни конечни елементи), како и хибриден FEM - BEM, значи метод на конечни елементи заедно со метод на гранични елементи. Без разлика кој нумерички метод ќе се користи или кој вид на величини ќе бидат избрани за непознати, определување на сигналот се одвива по иста законитост. Најпрво се врши испитување на моделот без присуство на дефект и се определува индуцираниот напон во сензорската/ките намотки:

$$V_0 = -j \omega N_s \int_L A_c d\ell$$

каде V_0 е индуцираниот напон во бездефектна состојба, N_s е бројот

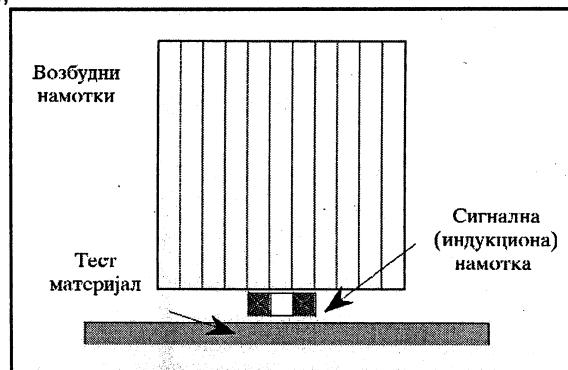
на навивки на сензорската намотка, A_c го претставува магнетниот вектор потенцијал, но само оној дел кој е резултат на врложните струи, а интегрирањето се врши по целата должина на сензорската намотка L. Со делење на овој индуциран напон со струјата која поминува низ намотката може да се добие и вредноста на импедансата на намотката [6].

Истата постапка се повторува и во случај на постоење на дефект, при што се добива некоја друга вредност за индуцираниот напон V_d . Со пресметување на разликата меѓу двата добиени сигнали може да се дефинира типот на дефектот и неговите карактеристики.

Во продолжение на овој труд, ќе се задржиме конкретно на еден вид на проба, т.н. проба со ротирачко поле која е една од најефикасните видови на проби базирани на вртоложни струи.

Проба со ротирачко поле (rotating field eddy-current probe)

Една од најмодерните проби кои работат на принципот на вртоложни струи за неструк-



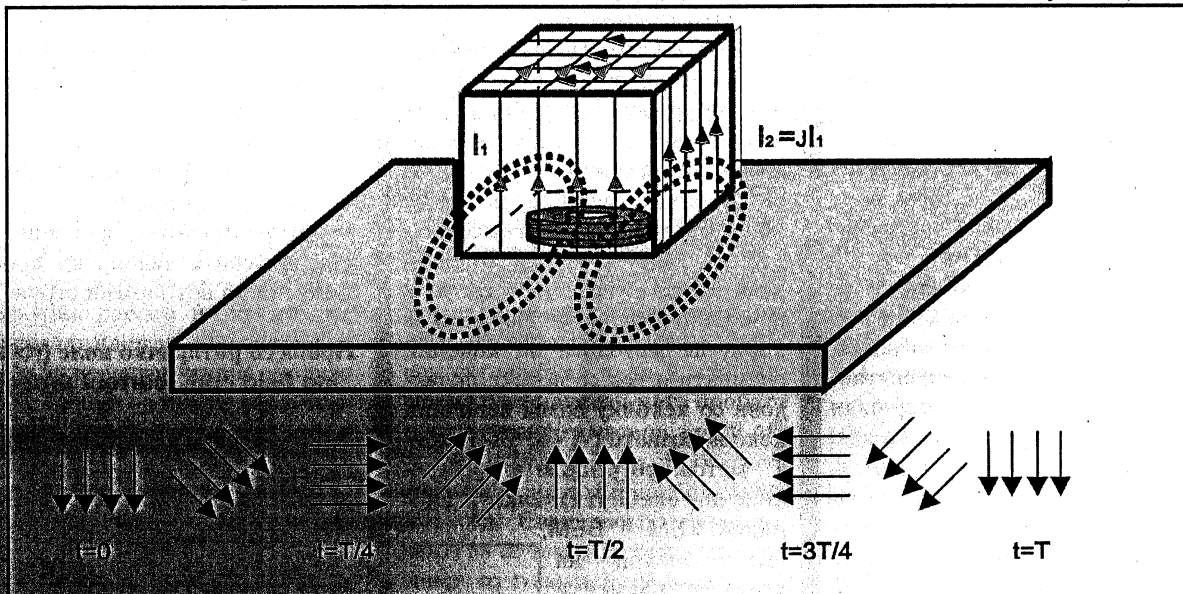
Слика 3: Шематски приказ на проба со ротирачко поле.

тивно тестирање на материјалите е т.н. проба со вртоложно поле [7], [8]. Шематски приказ на овој тип на проба или сензор, е прикажан на Сл. 3. Овој вид на проба се состои од две намотки кои се просторно изместени за 90° . Овие две намотки формираат квадратна

возбудна намотка како што е прикажано на сликата. На долната страна од возбудната намотка се наоѓа индукционата намотка или намотката во која се генерира сигналот кој потоа се води на засилувач и на соодветен дисплеј систем или друг уред за негово запишување и/или континуирано следење. Растојанието меѓу сензорската намотка и испитуваниот материјал има големо значење за квалитетот и точноста на мерењата, се вика *lift-off* и треба да се

намотка поминува возбудна струја со ист интензитет, но временски изместена за агол од $\pi/2$. Тоа значи дека ваква комбинација на намотките ќе резултира со појава на вртливо магнетно поле насочено према површината на материјалот што се испитува. Ова поле генерира протекување на вртложни струи низ проводниот материјал што се испитува. Насоката на вртложните струи се менува, односно исто така е ротиралка, но со константна амплиту-

Анализата на сигналите може да се врши паралелно со испитувањето или пак подоцна ако се користат уреди за запис на добиениот сигнал. Заради забрзување на детекцијата на дефектот како и негова точна квалификација и селекција во групата на сериозни дефекти или несериозни дефекти, најчесто се користат логички системи (*fuzzy - logic systems*) или системи базирани на претходно знаење (*knowledge based detection systems*). Овие



Слика 4. Индуцирани вртложни струи од страна на пробата со ротирално поле.

опрежува константно за време на целото мерење. Пробата се движи по должината на целиот испитуван материјал и се се следи сигналот како резултат на промената на индуцираниот напон во сензорската намотка, што е директен резултат на промената на просторната распределба и јачината на индуцираното магнетно поле како резултат на протекувањето на вртложните струи низ испитуваниот материјал.

Накратко ќе се осврнеме на принципот на работа на оваа проба. Веќе рековме дека нејзината возбудна намотка се состои од две намотки кои се меѓусебно просторно изместени за агол од 90° . Во исто време, низ секоја

да. Ова е важно од две причини:

1. овозможува полесна детекција на сите видови дефекти без разлика на нивната големина и позиција; внатрешен дефект (**ID - inner defect**) или надворешен дефект (**OD - outer defect**), и

2. сигналот добиен од сигналната намотка не зависи од насоката на дефектот во однос на намотката. Кај останатите проби ако насоката на скенирање не се совпаѓа со насоката на дефектот многу слаби сигнали се добиваат кои се најчесто од ред на големина на буката на сигналот и можат да доведат до подценување на значењето на дефектот, односно негово непотребно занемарување.

системи најчесто се составени од неуро мрежи, генетски алгоритми, вештачка интелигенција или едноставно се базирани на принцип на "правило - принцип" што во голема мерка го олеснува процесот на детекција или истиот го прави минимално зависен од субјективноста на операторот на испитувачкиот уред. Овој труд излегува од склопот на анализата на ваквите софистицирани уреди за анализа на сигналите и затоа тие нема да бидат разгледувани овде. Во овој труд, ние се задржуваме само на првиот и основен дел од неdestructивната анализа, а тоа е генерирање на точен и доволно јак сигнал кој може да даде доволно информации за дефектот.

4. Анализа на добиените сигнали

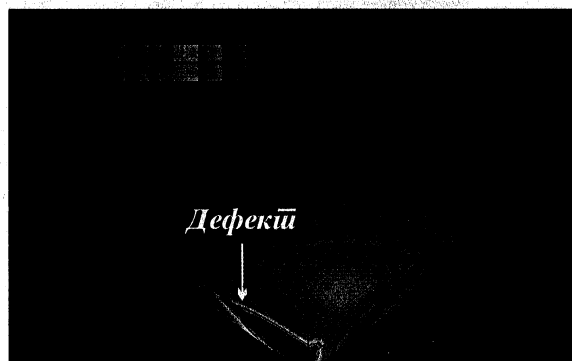
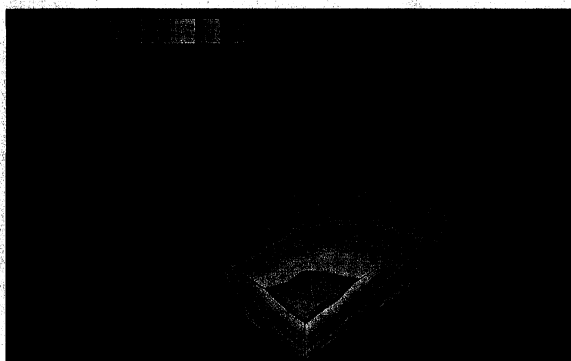
Веќе кажавме дека секој сигнал содржи големо количество на информации во врска со испитуваниот дефект и со негово правилно разбирање, може да се дефинира секој дефект и речиси сите негови карактеристики [7], [8]. Во овој труд ние ќе се задржиме само на неколку типични типови на дефекти и на сигналите со кои тие резултираат. Ќе ги разгледаме следните типични случаи:

(профил).

4.1. Типични дистрибуции на вртложните струи низ материјалот

На Сл. 4 се прикажани две типични распределби на вртложните струи во испитуваниот материјал - рамна плоча направена од материјалот **INCONEL** кој најчесто се користи за изработка на цевки во нуклеарната индустрија поради своите одлични физички својства. На сликата лево е прикажана дис-

левиот раб и се наоѓа на истата страна на која се наоѓа и пробата - што значи се работи за внатрешен дефект. Веднаш е забележливо дека поради постоењето на дефектот, вртложните струи се обидуваат да поминат под него, се концентрираат и имаат поголема јачина (црвената боја). Оваа појава не може да се забележи на левата слика каде нема никаков дефект. Овој зголемен интензитет на вртложни струи ќе резултира соодветно со појак сигнал во самата сензорска намотка. Како што ќе



а) рамна плоча од **INCONEL** без дефекти

б) рамна плоча од **ИНЦОНЕЛ** со дефект

Слика 5: Распределба на вртложните струи.

1. дефекти со различна позиција (**ID** и **OD** дефекти),
2. дефекти со различна должина,
3. дефекти со различна дебелина, и
4. дефекти со различна форма

трибуцијата на вртоложните струи во 1/4 од испитуваниот материјал без присуство на дефект. Десната слика го покажува истиот дел од испитуваниот материјал, но овој пат со дефект кој се протега по должината на

видиме подоцна низ текстов, не само аплитудата на сигналот туку и неговата фазна разлика ќе ни помогне за поточно да ги дефинираме карактеристиките на дефектот.

Продолжение во следниот број

продолжение од страна 9

обезбедат потребните средства, поточно да се затвори финансиската конкуренција за изградба на овој хидроелектричен капацитет за кој ќе бидат инвестирани 7,5 милиони германски марки.

И на неодамна одржаната стручна расправа по Нацрт-генералниот урбанистички план на Кичево, е констатирано дека е изготвена техничка документација-идеен проект за реконструкција и проширување на водоводната мрежа на Кичево до 2025 година, каде е предадена водоснабдителна норма за градот и за селата. Притоа се истакнува дека концепцијата за водоснабдување на Кичево се задржува, а за потребните количества вода во наредниот период (што ќе недостига), се предвидуваат нови зафати од акумулацијата на Бачишка Река и Грашница, од каде ТЕЦ "Осломеј" ќе се снабдува со технолошка вода, а постојните 200 литри вода во секунда што се користат во технолошкиот процес на термоцентралата ќе останат во цевководот на најдолгиот водовод во државата, односно ќе се користат исклучиво за задоволување на потребите на граѓаните.

Инаку, ХЕЦ "Бачишта" ќе има инсталирана сила од 4,7 мегавати, со годишно производство од 17 до 22 милиона киловат-часови електрична енергија. За супституцијата на водата што сега се користи како индустријска, ќе биде изграден цевковод во должина од околу шест километри од ХЕЦ "Бачишта" до ТЕЦ "Осломеј" и систем за наводнување на обработливите земјоделски површини. Исто така, со овој проект се планира изградба на акумулација на местото каде што Крива Река се влева во Бачишка Река во месноста Дарда Кула со акумулационен зафат од 3,5 милиони кубни метри вода.

Б. Таневски